

# Complex practical negotiations based on autonomous agents

Citation for published version (APA):

Chen, S. (2014). *Complex practical negotiations based on autonomous agents*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Maastricht University. <https://doi.org/10.26481/dis.20141021sc>

## Document status and date:

Published: 01/01/2014

## DOI:

[10.26481/dis.20141021sc](https://doi.org/10.26481/dis.20141021sc)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Summary

Over the past decade automated negotiation among autonomous software agents (agents for short) has developed into a topic of central interest in the area of intelligent agents and multi-agent systems. The main reason for this development is the broad range of applicability of automated negotiations in fields such as electronic commerce, electronic markets, supply chain management and service allocation. This thesis focuses on complex automated negotiation settings that show the following three challenging characteristics. First, the negotiating agents do not have knowledge about each other (i.e., they have not encountered before) and, in particular, do not have any prior information about the negotiation preferences or strategies of their respective opponents. Second, negotiation is being executed with deadline and with discount. This means that the negotiation process runs under real-time constraints and the final utility decreases over time according to some given discounting factor. And third, computational efficiency is important because agents (e.g., an agent running on a mobile device) may have very limited computing resources. These characteristics, which are very common in practical negotiations, impose high demands on the negotiation abilities of agents.

The *problem statement* that guided the research described in this thesis is:

How to design effective strategies for such complex negotiation settings and how to evaluate these strategies effectively?

Four complementary research questions were derived from this problem statement:

- *Research Question 1:* How to learn opponent models in complex negotiations?
- *Research Question 2:* How to make appropriate concessions in environments of high uncertainty and dynamics?
- *Research Question 3:* In addition to measuring the performance of negotiation strategies in tournament-based (thus fixed) negotiation scenarios, how to analyze the performance of negotiating agents in dynamic scenarios?
- *Research Question 4:* How to analyze the performance of a negotiation strategy in scenarios where a large population of negotiating autonomous agents is involved and the interaction range of the agents may be restricted?

After introducing the theme of this thesis and providing relevant background information in Chapters 1 and 2, respectively, the Research Questions 1 and 2 are

addressed in Chapters 3 and 4. Four learning-based negotiation strategies – OMAC, EMAR, OMAC\*, and Dragon – are presented that enable a negotiating agent to generate computationally affordable models of its opponents. These models serve as a basis for predicting the opponents’ future negotiation behaviors and making effective decisions during the negotiation process. A main difference of these four strategies is in the modeling techniques they apply: OMAC uses discrete wavelet transformation, EMAR uses empirical mode decomposition, OMAC\* combines discrete wavelet transformation and standard Gaussian processes, and Dragon relies on sparse pseudo-input Gaussian processes. With respect to concession making, these strategies provide different, effective solutions for two core requirements for successful negotiation, namely, the avoidance of premature concessions and the generation of counter-offers that are both attractive to the opponents and suited for exploring the negotiation space. Common to these strategies is that concessions are made in a highly flexible and dynamic style. Extensive experimental results are provided that demonstrate the qualities of these strategies. The results also show that they clearly outperform the best negotiation strategies from recent editions of the International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC) in a broad range of negotiation scenarios.

The Research Questions 3 and 4 are addressed in Chapters 5 and 6, respectively. The currently most common evaluation criterion for negotiation strategies is the performance level achieved in simulated tournaments. This criterion, however, is not suited for the evaluation of strategies in dynamic negotiation scenarios, that is, in scenarios in which agents are allowed to change their strategies during negotiation. In Chapter 5 it is shown how empirical game theory (EGT) can be exploited to evaluate negotiation strategies in such scenarios. Moreover, tournament-based evaluation (as well as EGT-based evaluation) is not suited for evaluating negotiation strategies in scenarios in which a large number of agents are involved and in which the individual agents interact only locally rather than with all other agents. In Chapter 6 it is shown how spatial evolutionary game theory can be used to evaluate the performance of strategies in such scenarios.

Finally, Chapter 7 summarizes the contributions of this thesis and identifies promising directions for future research that are opened by the described research.

Overall, the research described in this thesis advances the state of the art in automated negotiation in two important ways. First, by developing several novel negotiation strategies that offer highly effective opponent-modeling and concession-making techniques and methods. Second, by showing how game-theoretic concepts and techniques can be used for strategy evaluation in practically relevant negotiation scenarios for which the traditional and currently most common tournament-based evaluation approach fails short.

# Samenvatting

Het onderzoek in geautomatiseerde onderhandelingen tussen agenten heeft zich in het afgelopen decennium ontwikkeld tot een belangrijk onderwerp in het veld van intelligente agenten en multi-agent systemen. De hoofdreden hiervoor is de brede toepasbaarheid van geautomatiseerde onderhandelingen in verschillende domeinen, zoals e-commerce, elektronische markten, supply chain management en dienst-toewijzing. Dit proefschrift is gericht op complexe geautomatiseerde onderhandelingsomgevingen, welke de volgende drie uitdagende eigenschappen vertonen: Ten eerste, de onderhandelende agenten hebben geen voorafgaande kennis over elkaar, d.w.z. ze hebben mekaar niet vooraf ontmoet, en ze hebben geen toegang tot informatie over de onderhandelingsvoorkeuren of strategieën van de tegenstanders. Ten tweede, de onderhandelingen worden uitgevoerd met een deadline en met discontering. Dit houdt in dat het onderhandelingsproces wordt uitgevoerd met een reële tijdslimiet en dat het uiteindelijke uitkeringsbedrag mettertijd afneemt afhankelijk van een gegeven kortingsfaktor. Ten derde, aangezien de agenten over een beperkte rekenkracht beschikken is computationele efficiëntie cruciaal (b.v. een software agent op een smartphone). Deze typische eigenschappen stellen hoge eisen aan de onderhandelingsvaardigheden van agenten.

Het onderzoek van dit proefschrift is gestuurd door de volgende probleemstelling:

Hoe kan men effectieve strategieën voor complexe onderhandelingsomgevingen ontwikkelen en hoe kunnen deze strategieën effectief geëvalueerd worden?

Uit de probleemstelling zijn vier aanvullende onderzoeksvragen afgeleid:

- *Onderzoeksvraag 1:* Hoe kan men tegenstandermodellen leren tijdens complexe onderhandelingen?
- *Onderzoeksvraag 2:* Hoe kan men passende concessies uitvoeren in dynamische omgevingen met grote onzekerheid?
- *Onderzoeksvraag 3:* Hoe kan men de prestaties van onderhandelingsstrategieën meten in zowel toernooi-gebaseerde onderhandelingsscenario's alsook in dynamische scenario's?
- *Onderzoeksvraag 4:* Hoe kan men de prestatie van een onderhandelingsstrategie meten in een scenario met een groot aantal autonome onderhandelende agenten welke maar over een beperkt interactiebereik beschikken?

Het onderwerp van dit proefschrift en relevante achtergrondinformatie worden in hoofdstukken 1 en 2 behandeld, waarop volgend de onderzoeksvragen 1 en 2 in hoofdstukken 3 en 4 behandeld worden. Vier leer-gebaseerde onderhandelingsstrategieën – OMAC, EMAR, OMAC\*, en Dragon – worden gepresenteerd welke het voor een agent mogelijk maken om een computationeel efficiënt model van zijn tegenstanders te genereren. Deze modellen vormen de basis voor het voorspellen van het onderhandelgedrag van de tegenstanders en het sluiten van effectieve beslissingen tijdens het onderhandelingsproces. Het grote verschil tussen deze vier strategieën is de toegepaste modeleringstechniek: OMAC maakt gebruik van discrete wavelet transformaties, EMAR maakt gebruik van empirische mode-decompositie, OMAC\* combineert wavelet transformatie met standard Gauss-processen, en Dragon past sparse pseudo-input Gauss-processen toe. Met betrekking tot het doen van concessies bieden deze strategieën effectieve oplossingen voor twee kernvereisten van een succesvolle onderhandeling: namelijk het vermijden van voortijdige concessies en het genereren van tegenaanbiedingen, dewelke zowel aantrekkelijk zijn voor de tegenstanders alsook geschikt zijn voor het verkennen van de onderhandelingsruimte. Deze strategieën hebben met elkaar gemeen dat concessies in een zeer flexibel en dynamische stijl worden uitgevoerd. Met experimentele resultaten worden de kwaliteiten van deze strategieën gedemonstreerd. Deze resultaten laten ook zien dat ze duidelijk beter presteren dan de onderhandelingsstrategieën uit de recente edities van de International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC), en dit in een breed scala van onderhandelingsscenario's.

Onderzoeksvragen 3 en 4 worden in hoofdstukken 5 en 6 behandeld. Het momenteel meest gebruikte evaluatiecriterium voor onderhandelingsstrategieën is het behaalde prestatieniveau tijdens gesimuleerde toernooien. Dit criterium is helaas niet geschikt voor het evalueren van strategieën in dynamische scenario's, d.w.z. scenario's waar het de agenten toegelaten wordt om van strategie te wisselen tijdens de onderhandeling. In hoofdstuk 5 wordt getoond hoe empirische speltheorie (EGT) gebruikt kan worden voor het evalueren van strategieën in dit soort scenario's. Voor grootschalige evaluaties, waar een groot aantal agenten in deelnemen en ieder agent maar met een beperkt aantal agenten kan onderhandelen, zijn zowel de toernooi gebaseerde evaluatie alsook de EGT-evaluatie ongeschikt. In hoofdstuk 6 wordt getoond hoe ruimtelijke evolutionaire speltheorie gebruikt kan worden om de prestatie van strategieën in dit soort scenario's te meten.

Tot slot worden in hoofdstuk 7 de bijdragen van dit proefschrift samengevat en de door dit onderzoek mogelijk gemaakte richtingen voor toekomstig onderzoek geïdentificeerd.

Kortom, het in dit proefschrift omschreven onderzoek heeft de stand van zaken

in het veld van geautomatiseerde onderhandelingen op twee belangrijke manieren geavanceerd. Ten eerste, door het ontwikkelen van nieuwe onderhandelingsstrategieën welke zeer effectieve technieken bezitten voor het modelleren van tegenstanders en het sluiten van concessies. Ten tweede, door te demonstreren hoe concepten en technieken uit de speltheorie gebruikt kunnen worden voor het evalueren van strategieën in praktijk relevante onderhandelingsscenario's, voor welke de traditionele en gebruikelijke toernooi-gebaseerde evaluatie ontoereikend is.